



DOI 10.28925/2663-4023.2024.26.708

УДК 656.07:004.6:004.8

Довженко Надія Михайлівна

к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0003-4164-0066
n.dovzhenko@kubg.edu.ua

Мазур Наталія Петрівна

к.п.н., доцент, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0001-7671-8287
n.mazur@kubg.edu.ua

Костюк Юлія Володимирівна

PhD in Computer Science, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0001-5423-0985
y.kostiuk@kubg.edu.ua

Рзаєва Світлана Леонідівна

к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-7589-2045
s.rzaieva@kubg.edu.ua

ІНТЕГРАЦІЯ ІОТ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

Анотація. У статті детально проаналізовано концептуальні та практичні особливості інтеграції інтелектуальних транспортних систем (ІТС) у міське середовище з акцентом на використанні технологій Інтернету речей (ІоТ), штучного інтелекту (ШІ) та периферійних обчислень. Розроблено концептуальну модель ІТС, яка забезпечує не лише збір та обробку сенсорних даних в режимі реального часу, а й підтримку динамічного прийняття рішень на основі аналітики великих даних. Проаналізовано багаторівневу архітектуру ІТС, що передбачає використання сучасних алгоритмів оптимізації, прогнозування та кластеризації для підвищення адаптивності управління дорожнім трафіком, мінімізації заторів та зниження викидів CO₂. Наведено приклади успішного впровадження ІТС у провідних містах світу, які демонструють позитивний вплив на збільшення пропускної здатності транспортних артерій, зменшення рівня аварійності та покращення екологічної ситуації. Особливу увагу приділено питанням забезпечення кібербезпеки, яка є критичною для стабільного та надійного функціонування ІТС. Проаналізовано потенційні загрози, пов'язані з несанкціонованим доступом до системних ресурсів, і запропоновано впровадження передових механізмів шифрування, багатofакторної автентифікації та блокчейн-технологій для забезпечення цілісності та конфіденційності даних. Окремий акцент зроблено на розробці ефективних алгоритмів виявлення аномалій, здатних вчасно реагувати на нестандартні ситуації, такі як дорожньо-транспортні пригоди або раптові зміни у транспортних потоках. Це забезпечує стійкість і гнучкість системи в умовах динамічного міського середовища. Підкреслено перспективи подальшого розвитку ІТС через глибшу інтеграцію периферійних обчислень, технологій Big Data та ШІ, що сприятиме підвищенню загальної ефективності, безпеки та



адаптивності міської транспортної інфраструктури. Запропонована модель ІТС враховує енергоефективність, дозволяє прогнозувати транспортні потоки з високою точністю і гарантує екологічну сталість в умовах урбанізованого простору. У статті також наведено практичні рекомендації щодо впровадження розробленої ІТС, здатної еволюційно розвиватися та адаптуватися до змін інтенсивності руху, інфраструктурних обмежень і вимог екологічної безпеки.

Ключові слова: Інтернет Речей; IoT; сенсори; датчики; мережа; інтелектуальна транспортна система; «Розумне» місто; ШІ; безпека; енергоресурси; аномалії; надійність; вузли.

ВСТУП

Протягом останніх десятиліть кількість автомобілів у всьому світі стрімко зростає, що призводить до істотного збільшення транспортного навантаження на існуючі інфраструктури міст. Хоча впродовж довгого часу основним підходом до розв'язання проблем заторів було розширення дорожнього полотна, сучасні реалії демонструють необхідність більш ефективних підходів до використання наявних ресурсів. В умовах швидкої урбанізації, збільшення кількості транспортних засобів та зростання складності транспортних систем, адаптивне управління дорожнім рухом стає все більше критичним завданням [1].

Сучасний підхід до розв'язання проблеми ефективного функціонування міських транспортних систем базується на інтеграції передових технологій, зокрема штучного інтелекту (AI), технології Інтернету речей (IoT) та Big Data. Використання IoT-пристроїв (сенсорів, камер спостереження, лічильників трафіку, GPS-трекерів) дає можливість зчитувати, збирати та обробляти великі обсяги даних у реальному часі, що дозволяє забезпечити гнучке та своєчасне реагування на мінливі дорожні умови. Застосування методів машинного навчання чи глибинного навчання в аналізі цих даних дозволяє прогнозувати інтенсивність потоків, визначати закономірності та оперативно впроваджувати коригувальні заходи для мінімізації заторів і підвищення ефективності системи загалом [2].

Інтелектуальні транспортні системи (ІТС) спрямовані на підвищення «інтелекту» міст за рахунок комплексної оптимізації транспортних потоків [3]. Використання передових алгоритмів обробки даних та методів штучного інтелекту, зокрема методів машинного «зору», предиктивної аналітики, оптимізаційних алгоритмів і систем підтримки прийняття рішень, дозволяє сформувати адаптивні стратегії управління світлофорами, перерозподілу транспортних потоків, оптимізації паркувальної інфраструктури та розкладів громадського транспорту. Це, своєю чергою, сприяє зниженню рівня викидів CO₂, покращенню екологічної ситуації, скороченню часу у дорозі та підвищенню безпеки учасників дорожнього руху [4].

Таким чином, побудова інтелектуальної транспортної системи в умовах «розумного міста» є складним, але необхідним завданням, яке потребує міждисциплінарного підходу. Забезпечення безперервної інтеграції IoT-пристроїв, використання хмарних технологій для зберігання та обробки великих даних, застосування сучасних методів AI для прогнозування та управління трафіком, а також ефективна комунікація між компонентами системи в режимі реального часу дозволять суттєво підвищити ефективність роботи міської транспортної інфраструктури та задовольнити зростаючі потреби урбаністичних середовищ [5].



АКТУАЛЬНІ ВИКЛИКИ ТА ПРОБЛЕМИ

Концепція «розумного міста» передбачає інтеграцію Інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту (AI) у різноманітні елементи міської інфраструктури, включно з дорожньою. Використання мережі сенсорів та датчиків, розміщених на світлофорах, дорожніх знаках, освітлювальних опорах, мостах і транспортних вузлах, надає можливість отримувати велетенські обсяги даних у реальному часі. Такі дані включають інформацію про щільність та інтенсивність руху, рівень заторів, швидкісні режими, наявність дорожньо-транспортних пригод, а також атмосферні та погодні умови, що впливають на пропускну здатність доріг та безпеку переміщення [6].

Глибина поточного стану проблеми підтверджується рядом статистичних даних та фактів. Наприклад:

- Затори у великих містах призводять до істотних економічних витрат. Дослідження вказують, що водії у мегаполісах щорічно втрачають сотні годин через простой в дорожньому русі, що прямим чином відображається на продуктивності праці, збільшуючи витрати компаній та погіршуючи якість життя мешканців. За деякими оцінками, через затори час щоденних поїздок може зростати на 30–50%, формуючи багатомільярдні втрати для економіки регіону [7].
- Дорожні затори є суттєвим джерелом забруднення повітря, що містить підвищені концентрації твердих частинок, оксидів азоту, вуглецю та інших шкідливих речовин. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, передчасні смертності, пов'язані із забрудненням зовнішнього повітря, сягають 4,2 мільйона випадків на рік, і значна частина цього забруднення формується саме викидами від транспортних засобів [8]. Таке середовище сприяє розвитку респіраторних та серцево-судинних захворювань, а також може збільшувати ризик онкологічних хвороб.
- Зі швидким зростанням кількості населення в містах та підвищенням рівня урбанізації наявні системи громадського транспорту нерідко стають перевантаженими. Своєю чергою це призводить до зростання часу очікування, переповненості транспортних засобів та зниження надійності сервісів. Як наслідок, все менше людей готові користуватися громадським транспортом, віддаючи перевагу приватним автомобілям. Така динаміка посилює навантаження на дорожню мережу та формує замкнене коло проблем [9].

В табл. 1 приведено порівняльний аналіз різноманітних підходів до реалізації концепції «розумних» транспортних систем у різних закордонних містах та країнах.

Наведений порівняльний аналіз і узагальнені дані про приклади «розумних» міст та реалізовані проекти інтелектуальних транспортних систем не вичерпують усього спектра можливих рішень. Вони лише ілюструють загальні тенденції й існуючі підходи до впровадження інноваційних технологій у транспортну інфраструктуру різних країн.



Таблиця 1

Порівняльний аналіз «розумних» транспортних систем закордонних міст [10–16]

Місто, Країна	Проект	Технології	Сенсори та датчики	Перспективні плани для впровадження в 2030–2050 рр
Барселона (Іспанія)	GrowSmarter	Розумні світлофори, інтеграція з транспортними системами	Інфрачервоні датчики, мікрофони для шумового моніторингу	Масштабування інтелектуальної транспортної системи для покриття всієї території міста, використання нейронних мереж для передбачення заторів
Амстердам, Нідерланди	Amsterdam Smart City	IoT-мережі для збору даних, платформи для моніторингу трафіку	Датчики трафіку, GPS-трекери	Впровадження повністю автономних систем управління рухом із самонавчанням.
Стокгольм, Швеція	Green IT	Розумні світлофори, інтеграція з мобільними додатками	Камери для моніторингу доріг, датчики викидів CO ₂	Створення мережі автономного громадського транспорту на основі deep learning.
Сінгапур, Сінгапур	Smart Nation	Інтегровані транспортні системи для авто та громадського транспорту	LIDAR, радіолокаційні сенсори, камери	Впровадження автономних автобусів та розширення системи світлофорів з адаптивним управлінням.
Дубай, ОАЕ	Smart Dubai	Автономні таксі, розумні дорожні знаки	Камери високої чіткості, теплові сенсори	Масштабне розгортання автономних транспортних засобів та інтеграція з центральними системами управління ІІІ.
Мілтон-Кінз, Велика Британія	MK:Smart	Розподілені сенсорні мережі для трафіку	Ультразвукові датчики	Використання reinforcement learning для адаптивного управління трафіком у реальному часі.
Гельсінкі, Фінляндія	Smart Kalasatama	Інтелектуальне паркування, оптимізація громадського транспорту	Магнітометри для визначення зайнятості паркомісць	Інтеграція прогнозування погодних умов для транспорту.
Нью-Йорк, США	NYC Smart City	Розумні світлофори, мобільні додатки для трафіку	Датчики руху, GPS	Впровадження автономного громадського транспорту та системи прогнозування аварій.
Токіо, Японія	Tokyo Smart City	Автономні транспортні засоби, розумні дороги	Інфрачервоні камери, датчики освітленості	Інтеграція AI для автономних автобусів, розумні світлофори нового покоління.

Впровадження AI та IoT у системи управління дорожнім рухом вбачає у собі можливість суттєво знизити негативні наслідки заторів, підвищити швидкість пересування та покращити якість життя міських мешканців. Зрештою, формування адаптивних, інтелектуальних транспортних систем є важливим кроком у побудові сучасних урбаністичних середовищ із сталим розвитком [17].

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

Сучасні інтелектуальні транспортні системи (ІТС) покладаються на тісну інтеграцію новітніх рішень, а саме: Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та хмарних технологій для забезпечення ефективного й безпечного управління дорожнім рухом в умовах інтенсивної урбанізації. Концепція «розумного» міста передбачає розгортання розгалуженої мережі IoT-пристроїв — сенсорів, детекторів, камер та інших елементів дорожньої інфраструктури, — які в режимі реального часу генерують великі обсяги даних про транспортні потоки, погодні умови, екологічний стан тощо [18].

Для ілюстрації масштабів проблеми можна розглянути приклад Лондона (Велика Британія), де впроваджено систему керування трафіком SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique). Вона використовує дані від магнітометрів та індуктивних детекторів для оптимізації роботи світлофорів у реальному часі [19].

Припустимо, у місті встановлено близько 10 000 сенсорів, кожен з яких генерує приблизно 1 Кб даних за секунду. Таким чином, лише від цих сенсорів можна отримувати майже 864 Гб даних щодня. З огляду на додаткові джерела даних — камери спостереження, датчики якості повітря, метеостанції — загальний обсяг інформації зростає багаторазово.

Ефективна обробка таких великих масивів даних потребує потужних засобів зберігання, аналітики та інтелектуальних алгоритмів, здатних приймати оперативні управлінські рішення в режимі реального часу.

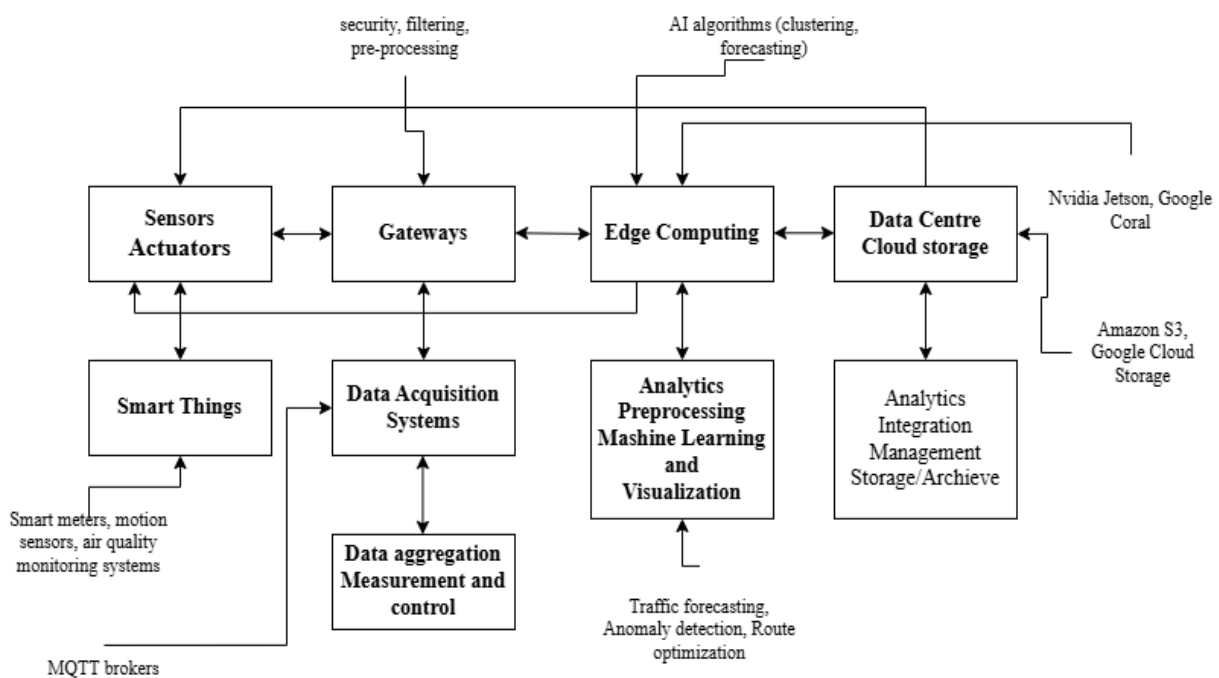


Рис. 1. Архітектура інтелектуальної транспортної системи

Перший етап «Збір і підготовка даних». Основна система (рис. 1) базується на використанні великої кількості IoT-пристроїв, розміщених по всьому місту, які забезпечують збір даних. Дані передаються через шлюзи до систем обробки, що дозволяє використовувати аналітику для прийняття рішень у реальному часі.



Одним із перших кроків у створенні IoT-мережі в місті є встановлення IoT-пристроїв на ключових точках, таких як перехрестя. В цьому випадку, пристрої збиратимуть інформацію про поточну ситуацію на дорогах і передаватимуть її до центральної системи. Для моделі використовуються чотири основні типи IoT-пристроїв:

- Камери спостереження, адже є найбільш поширеними пристроями в міських умовах. Вони забезпечують основний потік даних про транспортний рух на кожному перехресті. Камери в реальному часі фіксують ситуацію на дорогах, що дозволяє моделі аналізувати транспортні потоки та ідентифікувати затори. Отримані з камер дані є ключовими для аналітики, зокрема для прогнозування та прийняття рішень щодо оптимізації руху;
- Датчики світлофорів здатні фіксувати кількість транспортних засобів, які очікують проїзду на перехрестях, і передавати дані до системи. На основі отриманої інформації алгоритми моделі, із додаванням алгоритмів AI, оптимізують тривалість сигналів світлофора, забезпечуючи зменшення заторів і плавність руху на перехрестях;
- Детектори транспортних засобів можуть розташовуватися вздовж доріг і здатні реєструвати транспортний потік, що наближається до умовних точок на перехрестях. Вони надають додаткову інформацію для моделі, покращуючи точність її рішень. Детектори дозволяють визначати інтенсивність трафіку на основних магістралях і забезпечують ефективну маршрутизацію;
- Датчики погоди забезпечують моніторинг погодних умов у різних районах міста, що дозволяє системі адаптувати управління дорожнім рухом до поточних умов. Наприклад, під час несприятливої погоди модель може передбачати збільшення заторів у певних зонах і пропонувати рішення для їх мінімізації;
- Інфрачервоні сенсори доцільно запроваджувати на пішохідних переходах для автоматичного управління світлофорами, щоб забезпечити безпеку пішоходів і зменшити затримки в русі транспорту;
- Звукові сенсори моніторять рівень шуму в міській інфраструктурі, забезпечуючи дані для екологічного аналізу та адаптації дорожнього руху у зонах з високою акустичною забрудненістю;
- IoT-камери необхідні для розпізнавання номерних знаків, відстеження транспортних засобів, які порушують правила руху, та паралельного моніторингу при появі аварійних ситуацій;
- Паркувальні сенсори визначають наявність вільних місць на парковках і передають інформацію до мобільних додатків або інформаційних табло, що мінімізує час, витрачений на пошук паркувального місця;
- Електронні пристрої зв'язку для громадського транспорту підключені до центральної системи, забезпечують оновлення розкладу і маршруту громадського транспорту в режимі реального часу, що підвищує точність його роботи;
- IoT для велосипедистів та електроскутерів включають датчики швидкості, індикатори руху та автоматичні зупинки. Забезпечують безпеку користувачів та інтеграцію з загальними транспортними системами [20].



Другий етап «Обробка, аналітика та передача даних». Зібрані дані потрапляють до шлюзів (або аналогічних пристроїв), де здійснюється попередня обробка, фільтрація, шифрування та забезпечення безпеки. Периферійні обчислення (Edge Computing) дозволяють виконувати базову аналітику та машинне навчання безпосередньо на межі мережі, що мінімізує затримки та скорочує навантаження на центральні сервери. Хмарні технології, такі як Amazon S3 або Google Cloud Storage, забезпечують масштабованість і надійність. Зібрані дані класифікуються за різними параметрами: кількість транспортних засобів, швидкість руху, рівень заповненості дороги, погодні умови тощо. Завдяки цьому можна оперативно виявляти аномалії в дорожньому русі, прогнозувати затори й аварії, а також адаптувати роботу світлофорів та транспортних засобів у реальному часі [21].

Третій етап «Інтеграція даних і управління». Цей етап відповідає за тривале зберігання та аналіз зібраної інформації у хмарному середовищі. Дані, які потребують глибокого аналізу або довгострокового зберігання, надходять до центру обробки даних у хмарі. Для цього використовуються високошвидкісні комунікаційні мережі.

Центр обробки даних виконує такі задачі, як глибокий аналіз (використання великих даних (Big Data) для виявлення довгострокових тенденцій у русі транспорту), моделювання сценаріїв (створення моделей для оптимізації транспортної інфраструктури) та інтеграція (об'єднання даних із різних джерел, таких як погода, якість повітря, транспортні потоки) [22].

Хмарні сервіси, такі як Amazon S3 або Google Cloud Storage, дозволяють зберігати великі обсяги даних і забезпечують доступність інформації для інших компонентів системи. Наприклад, на основі збережених даних про рух за останні 6 місяців модель визначає найбільш завантажені маршрути в місті та пропонує рішення для їх оптимізації.

Четвертий етап «Реакція та виконання рішень». На цьому етапі оброблені дані використовуються для впровадження рішень у реальному світі. Наприклад, виконавчі пристрої забезпечують виконання рішень, прийнятих системою. Розумні світлофори динамічно змінюють час роботи залежно від поточного транспортного потоку, а інформаційні табло повідомляють водіям про затори, аварії або об'їзди. Своєю чергою, системи паркування автоматично змінюють тарифи залежно від завантаженості паркувальних місць. У разі виявлення аномалій, таких як аварії або перекриття доріг, система може автоматично направляти транспорт іншим, альтернативним маршрутом.

П'ятий етап «Підсумковий аналіз і оптимізація». На цьому етапі система аналізує накопичені дані для вдосконалення своєї роботи. Наприклад, на основі аналізу останніх аварій система може оптимізувати маршрути, щоб зменшити ризик подібних інцидентів у майбутньому. Досягається це шляхом виявлення довгострокових тенденцій, таких як пікові години навантаження на дорогах або часто повторювані аварійні сегменти. Важливим аспектом цього етапу є впровадження нових алгоритмів і технологій для підвищення точності прогнозування, швидкості реагування на зміни в дорожньому русі та забезпечення ефективного управління транспортною системою. і технологій для підвищення точності прогнозування та швидкості реагування [23].

ОСНОВНІ АСПЕКТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

При дослідженні особливостей впровадження інтелектуальних транспортних систем У рамках сучасних інтелектуальних транспортних систем (ІТС) ключову роль відіграють системи управління, призначені для динамічної оптимізації руху на міських

автошляхах. Зокрема, широко застосовуються адаптивні світлофори, інформаційні табло змінного змісту (Variable Message Signs, VMS) та інтегровані платформи управління дорожнім рухом [24], [25].

Їх поєднання зі штучним інтелектом (ШІ) та Інтернетом речей (IoT) формує комплексні рішення, що дають змогу суттєво підвищити ефективність, безпеку та екологічну сталість транспортних систем. Серед переваг впровадження інтелектуальної моделі управління транспортом можна виокремити наступні:

- Використання адаптивних світлофорів та VMS сприяє зменшенню затворів і скороченню часу в дорозі. Наприклад, у Лос-Анджелесі впровадження адаптивної системи управління світлофорами знизило час затримок на 16% та зменшило викиди CO₂ на 10% [26]. Аналогічно, у Барселоні інтелектуальні системи знизили середній час у дорозі на 13% [10].

На рис. 2 представлено порівняльний аналіз зниження затримок дорожнього руху (Delay Reduction) у відсотках для трьох міст: Лос-Анджелеса, Барселони та Сінгапуру. Стопчикова діаграма ілюструє, наскільки впровадження інтелектуальних транспортних систем та адаптивних світлофорів сприяє скороченню часу очікування на дорогах у кожному з цих міст.

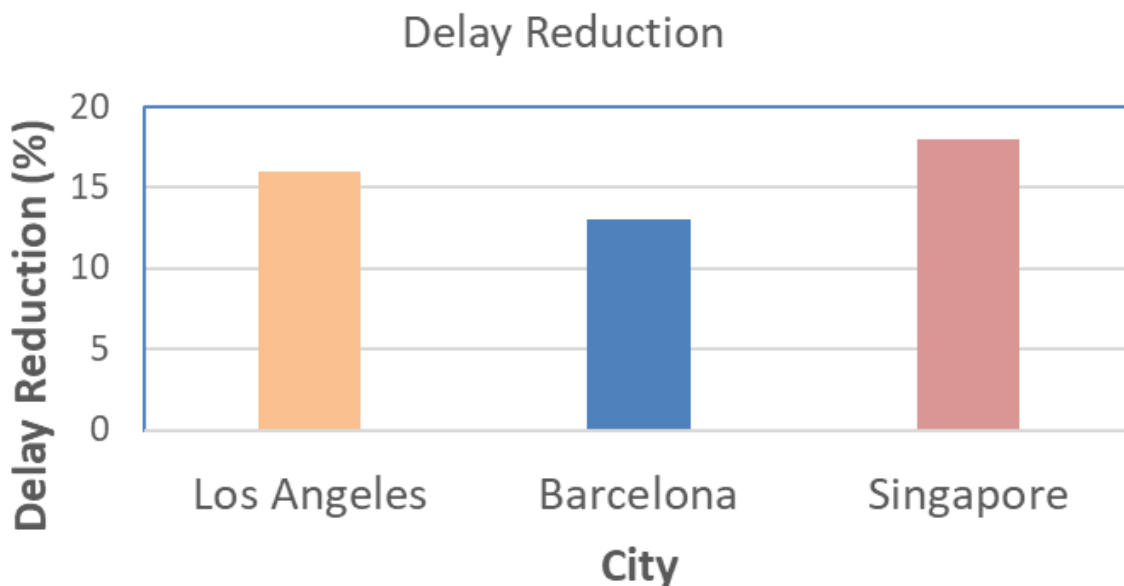


Рис. 2. Порівняння значень затримок руху в Лос-Анджелесі, Барселоні та Сінгапурі після впровадження інтелектуальних транспортних систем

- Оптимізація руху допомагає зменшити споживання пального та викиди парникових газів. За даними Агентства охорони навколишнього середовища США (EPA), автомобілі на холостому ходу можуть сприяти до 25% від загального обсягу транспортних викидів [27]. У місті Осло запровадження «зелених хвиль» для громадського транспорту дозволило знизити викиди CO₂ на 12% [28].

На рис. 3 наведено відсоткове зменшення викидів CO₂ у Лос-Анджелесі, Барселоні та Осло, досягнуте завдяки впровадженню інтелектуальних транспортних систем.

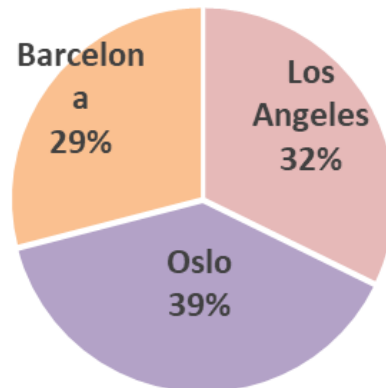
CO₂ Reduction (%)

Рис. 3. Відсоток зниження викидів CO₂ після впровадження інтелектуальних транспортних систем у Лос-Анджелесі, Барселоні та Осло

- Прогнозний аналіз та оперативне реагування на аварії дозволяють зменшити кількість дорожньо-транспортних пригод. У Стокгольмі після впровадження інтелектуальних систем кількість аварій знизилася на 30%, а в Лондоні — на 25%.

Accident Reduction

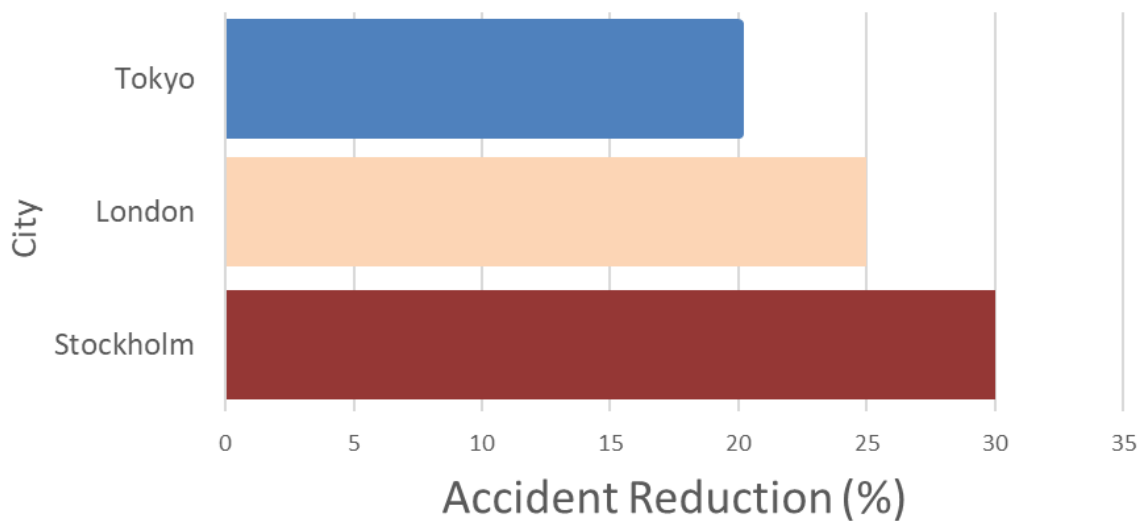


Рис. 4. Показник скорочення аварійності після впровадження інтелектуальних транспортних рішень у різних містах світу

На рис. 4. показано зниження кількості дорожньо-транспортних пригод у Токіо, Лондоні та Стокгольмі після впровадження інтелектуальних транспортних систем.

- Скорочення заторів знижує витрати на паливе, технічне обслуговування транспортних засобів та підвищує загальну продуктивність транспортної інфраструктури [29].



ВИМОГИ ДО КІБЕРБЕЗПЕКИ ТА ЗАХИСТУ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

Невіддільним елементом інтелектуальних транспортних систем (ІТС), що використовують Інтернет речей (ІоТ), штучний інтелект (ШІ) та великі дані, є гарантування високого рівня кібербезпеки. Такі системи щомиті генерують і обробляють величезні обсяги інформації, забезпечуючи координацію дорожнього руху в реальному часі, оптимізацію маршрутів та підвищення безпеки на дорогах. Відсутність належного захисту робить ІТС вразливими до потенційних кібератак, які можуть призвести не лише до технічних збоїв чи витоку даних, а й загрожувати життю та здоров'ю учасників дорожнього руху.

Для ефективного захисту ІоТ-рішень та даних у транспортному секторі доцільно впроваджувати низку превентивних заходів. По-перше, використання сучасних алгоритмів шифрування (наприклад, AES-256) є фундаментом безпеки. Це дозволяє надійно захищати дані, що передаються між пристроями та хмарними сервісами. По-друге, впровадження багатофакторної автентифікації істотно знижує ризик несанкціонованого доступу до системи, а застосування систем IDS та IPS дозволяє оперативно виявляти та блокувати підозрілу мережеву активність. Варто також регулярно оновлювати програмне забезпечення ІоТ-пристроїв, позбавляючись від потенційних вразливостей, та передбачати резервне копіювання критичних даних, що надасть змогу швидко відновити функціонування системи в разі кібератак чи технічних збоїв [30].

Загрози для ІТС не є гіпотетичними. Наприклад, у 2021 році DDoS-атака на систему управління дорожнім рухом у Флориді спричинила тимчасову відмову світлофорів, що фактично призвело до транспортного колапсу. Інший випадок, у 2020 році в Німеччині, пов'язаний із витоком даних у рамках проекту розумного міста, розкрив конфіденційну інформацію про переміщення транспортних засобів, поставивши під загрозу приватність та безпеку тисяч громадян.

Для підвищення стійкості до кіберзагроз фахівці радять регулярно проводити аудити безпеки та коригувати внутрішні політики відповідно до визнаних міжнародних стандартів (ISO/IEC 27001). Крім того, перспективним напрямом є використання технології блокчейн, що підвищує прозорість та достовірність передаваних даних. Додатковою мірою захисту може стати розподілена архітектура обробки даних, яка знижує ймовірність масштабних збоїв у разі атаки на один із вузлів системи. Отже, забезпечення кібербезпеки має бути органічно інтегрованим у проектування, впровадження та експлуатацію інтелектуальних транспортних систем. Тільки за умови комплексного підходу до захисту даних, інфраструктури та користувачів можливо гарантувати надійність, безпеку та довіру до таких технологічних рішень у сучасних міських середовищах [31].

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтелектуальні транспортні системи (ІТС), інтегровані з технологіями Інтернету речей (ІоТ), штучного інтелекту (ШІ) та периферійних обчислень, формують фундамент нової парадигми міської мобільності, орієнтованої на сталий розвиток та безпеку. У статті було розроблено концептуальну модель ІТС, що дозволяє не лише ефективно збирати та аналізувати дані в реальному часі, але й здійснювати прогнозування



транспортних потоків та динамічне прийняття рішень. Запропонована модель демонструє значний потенціал для зменшення заторів, скорочення часу подорожей та зниження викидів CO₂.

Однак впровадження таких систем пов'язане з численними викликами. Серед них — висока вартість розгортання інфраструктури, необхідність забезпечення комплексної кібербезпеки та мінімізація ризиків несанкціонованого доступу до даних. Аналіз виявлених проблем підтверджує важливість використання сучасних алгоритмів шифрування, багатофакторної автентифікації та технологій блокчейну для захисту даних. Розроблені в статті підходи до виявлення аномалій, прогнозування аварій та оптимізації руху підкреслюють адаптивність і надійність запропонованих рішень.

Загалом, інтелектуальні транспортні системи є перспективним напрямом для покращення ефективності та безпеки міської транспортної інфраструктури, що робить їх критично важливими для досягнення сталого розвитку та підвищення якості життя в урбанізованих середовищах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang, K. & Batterman, S. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Sci. Total Environ.*, 450–451, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>
2. Nguyen, H., Nguyen, P., & Bui, V. (2022). Applications of Big Data Analytics in Traffic Management in Intelligent Transportation Systems. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 6, 177. <https://doi.org/10.30630/joiv.6.1-2.882>
3. Tran, D.-K., Hoang Dinh, Q., Le, V.-T., Thai, M.-D., & Do, T.-H. (2022). Real-Time Traffic Flow Prediction Using Big Data Analytics. *Intelligence of Things: Technologies and Applications. ICIT 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 148. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15063-0_38
4. Dmitrieva, E., Pathani, A., Pushkarna, G., Acharya, P., Rana, M., & Surekha, P. (2024). Real-Time Traffic Management in Smart Cities: Insights from the Traffic Management Simulation and Impact Analysis. *BIO Web of Conferences*, 86. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248601098>
5. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
6. Bibri, S. E. (2018). *Smart sustainable cities of the future*. Springer.
7. *INRIX Global Traffic Scorecard*. (2023). INRIX Research. <https://inrix.com/scorecard>
8. *Ambient (outdoor) air quality and health. Fact sheet*. (2024). World Health Organization. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
9. Bibri, S., & Krogstie, J. (2017). Smart Sustainable Cities of the Future: An Extensive Interdisciplinary Literature Review. *Sustainable Cities and Society*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016>
10. *GrowSmarter*. (2024). <https://grow-smarter.eu/home/>
11. *Amsterdam Smart City*. (2024). <https://amsterdamsmartcity.com/>
12. *Smart Nation Singapore*. (2024). <https://www.smartnation.gov.sg/>
13. *Smart Dubai*. (2024). <https://www.smartdubai.ae/>
14. *MK:Smart*. (2024). <https://www.mksmart.org/>
15. *Smart Kalasatama*. (2024). <https://fiksukalasatama.fi/en/>
16. *Tokyo Smart City*. (2024). Tokyo Metropolitan Government. <https://www.metro.tokyo.lg.jp/>
17. Cervero, R. (2014). Transport Infrastructure and the Environment in the Global South: Sustainable Mobility and Urbanism. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, 25, 174–191. <https://doi.org/10.5614/jpwk.2015.25.3.1>
18. Ferrández-Pastor, F. J., et al. (2018). Developing ubiquitous smart cities sensor network platform. *Sensors*, 18(12), 4127. <https://doi.org/10.3390/s16071141>
19. Bretherton, R. D. (1990). SCOOT Urban Traffic Control System. *IFAC Proceedings*, 23(2), 237–239. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)52676-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)52676-2)
20. Goswami, S. & Kumar, A. (2022). *Traffic Flow Prediction Using Deep Learning Techniques*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10551-7_15



21. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
22. Barthélemy, J., Verstaavel, N., Forehead, H., & Perez, P. (2019). Edge-Computing Video Analytics for Real-Time Traffic Monitoring in a Smart City. *Sensors*, 19(9), 2048. <https://doi.org/10.3390/s19092048>
23. Gupta, S., Hamzin, A., & Degbelo, A. (2018). A low-cost open hardware system for collecting traffic data using Wi-Fi signal strength. *Sensors*, 18(11), 3623. <https://doi.org/10.3390/s18113623>
24. Yousuf, S., & Thakur, A. (2023). A Review Intelligent Transport System. *Zeitschrift fur celtische Philologie*, 10, 2017–2045.
25. Biswas, A., & Wang, H.-C. (2023). Autonomous Vehicles Enabled by the Integration of IoT, Edge Intelligence, 5G, and Blockchain. *Sensors*, 23(4), 1963. <https://doi.org/10.3390/s23041963>
26. L.A. Department of Transportation Report. (n. d.). <https://ladot.lacity.gov/annual-report-yr-23>
27. Environmental Protection Agency (EPA) (2024). *Quarterly Greenhouse Gas Emissions Indicator Report 2024 Quarter 2*. (2024). <https://www.epa.ie/publications/monitoring--assessment/climate-change/air-emissions/quarterly-greenhouse-gas-emissions-indicator-report-2024-quarter-2.php>
28. Oslo Annual Report. (2023). <https://www.norfund.no/annualreport-2023/this-is-norfund/responsible-investor/climate-and-environment/>
29. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). *The Geography of Transport Systems*. <https://doi.org/10.4324/9781315618159>
30. Akhil, J., Samreen, S., Aluvalu, R., & Reddy, K. (2018). Cyber Physical Systems for Smart Cities Development. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7, 36–38. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.6.20229>
31. Aluko, S. (2024). Cybersecurity and defense in intelligent transportation systems. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 13, 871–879. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.13.1.0469>

**Nadiia Dovzhenko**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Information and
Cybernetic Security named after Professor Volodymyr Buryachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University
Associate Professor of the Department of Digital Technologies in Energy
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4164-0066
n.dovzhenko@kubg.edu.ua

Nataliia Mazur

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Information and
Cybersecurity named after Professor Volodymyr Buriak
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-7671-8287
n.mazur@kubg.edu.ua

Yuliia Kostiuk

PhD in Computer Science, Associate Professor of the Department of
Information and Cyber Security named after Professor Volodymyr Buriachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-5423-0985
y.kostiuk@kubg.edu.ua

Svitlana Rzaieva

PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Computer Science
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-7589-2045
s.rzaieva@kubg.edu.ua

INTEGRATION OF IOT AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

Abstract. The article provides a detailed analysis of the conceptual and practical features of integrating Intelligent Transportation Systems (ITS) into urban environments, with a focus on the use of Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and edge computing technologies. A conceptual model of ITS has been developed, enabling not only real-time collection and processing of sensor data but also dynamic decision-making based on big data analytics. The multi-level architecture of ITS is examined, employing modern optimization, prediction, and clustering algorithms to enhance traffic management adaptability, minimize congestion, and reduce CO₂ emissions. Examples of successful ITS implementations in leading global cities are presented, showcasing their positive impact on increasing traffic throughput, reducing accident rates, and improving environmental conditions. Particular attention is paid to cybersecurity issues, which are critical for the stable and reliable operation of ITS. Potential threats associated with unauthorized access to system resources are analyzed, and the implementation of advanced encryption mechanisms, multi-factor authentication, and blockchain technologies is proposed to ensure data integrity and confidentiality. The article also highlights the development of effective anomaly detection algorithms capable of promptly responding to non-standard situations, such as traffic accidents or sudden changes in traffic flows. This ensures system resilience and flexibility in dynamic urban environments. The prospects for further ITS development through deeper integration of edge computing, Big Data technologies, and AI are emphasized, contributing to enhanced overall efficiency, safety, and adaptability of urban transportation infrastructure. The proposed ITS model incorporates energy efficiency, enables highly accurate traffic flow prediction, and ensures environmental sustainability in urbanized spaces. Practical recommendations for implementing the developed ITS are provided, emphasizing its ability to evolve and adapt to changes in traffic intensity, infrastructural constraints, and environmental safety requirements.



Keywords: Internet of Things; IoT; sensors; detectors; network; intelligent transportation system; smart city; AI; security; energy resources; anomalies; reliability; nodes.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Zhang, K. & Batterman, S. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Sci. Total Environ.*, 450–451, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>
2. Nguyen, H., Nguyen, P., & Bui, V. (2022). Applications of Big Data Analytics in Traffic Management in Intelligent Transportation Systems. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 6, 177. <https://doi.org/10.30630/joiv.6.1-2.882>
3. Tran, D.-K., Hoang Dinh, Q., Le, V.-T., Thai, M.-D., & Do, T.-H. (2022). Real-Time Traffic Flow Prediction Using Big Data Analytics. *Intelligence of Things: Technologies and Applications . ICIT 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 148. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15063-0_38
4. Dmitrieva, E., Pathani, A., Pushkarna, G., Acharya, P., Rana, M., & Surekha, P. (2024). Real-Time Traffic Management in Smart Cities: Insights from the Traffic Management Simulation and Impact Analysis. *BIO Web of Conferences*, 86. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248601098>
5. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
6. Bibri, S. E. (2018). *Smart sustainable cities of the future*. Springer.
7. *INRIX Global Traffic Scorecard*. (2023). INRIX Research. <https://inrix.com/scorecard>
8. *Ambient (outdoor) air quality and health. Fact sheet*. (2024). World Health Organization. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
9. Bibri, S., & Krogstie, J. (2017). Smart Sustainable Cities of the Future: An Extensive Interdisciplinary Literature Review. *Sustainable Cities and Society*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016>
10. *GrowSmarter*. (2024). <https://grow-smarter.eu/home/>
11. *Amsterdam Smart City*. (2024). <https://amsterdamsmartcity.com/>
12. *Smart Nation Singapore*. (2024). <https://www.smartnation.gov.sg/>
13. *Smart Dubai*. (2024). <https://www.smartdubai.ae/>
14. *MK:Smart*. (2024). <https://www.mksmart.org/>
15. *Smart Kalasatama*. (2024). <https://fiksukalasalatama.fi/en/>
16. *Tokyo Smart City*. (2024). Tokyo Metropolitan Government. <https://www.metro.tokyo.lg.jp/>
17. Cervero, R. (2014). Transport Infrastructure and the Environment in the Global South: Sustainable Mobility and Urbanism. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, 25, 174–191. <https://doi.org/10.5614/jpwk.2015.25.3.1>
18. Ferrández-Pastor, F. J., et al. (2018). Developing ubiquitous smart cities sensor network platform. *Sensors*, 18(12), 4127. <https://doi.org/10.3390/s18124127>
19. Bretherton, R. D. (1990). SCOOT Urban Traffic Control System. *IFAC Proceedings*, 23(2), 237–239. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)52676-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)52676-2)
20. Goswami, S. & Kumar, A. (2022). *Traffic Flow Prediction Using Deep Learning Techniques*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10551-7_15
21. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
22. Barthélemy, J., Verstaavel, N., Forehead, H., & Perez, P. (2019). Edge-Computing Video Analytics for Real-Time Traffic Monitoring in a Smart City. *Sensors*, 19(9), 2048. <https://doi.org/10.3390/s19092048>
23. Gupta, S., Hamzin, A., & Degbelo, A. (2018). A low-cost open hardware system for collecting traffic data using Wi-Fi signal strength. *Sensors*, 18(11), 3623. <https://doi.org/10.3390/s18113623>
24. Yousuf, S., & Thakur, A. (2023). A Review Intelligent Transport System. *Zeitschrift fur celtische Philologie*, 10, 2017–2045.
25. Biswas, A., & Wang, H.-C. (2023). Autonomous Vehicles Enabled by the Integration of IoT, Edge Intelligence, 5G, and Blockchain. *Sensors*, 23(4), 1963. <https://doi.org/10.3390/s23041963>
26. *L.A. Department of Transportation Report*. (n. d.). <https://ladot.lacity.gov/annual-report-yr-23>
27. *Environmental Protection Agency (EPA) (2024). Quarterly Greenhouse Gas Emissions Indicator Report 2024 Quarter 2*. (2024). <https://www.epa.ie/publications/monitoring--assessment/climate-change/air-emissions/quarterly-greenhouse-gas-emissions-indicator-report-2024-quarter-2.php>



28. *Oslo Annual Report*. (2023). <https://www.norfund.no/annualreport-2023/this-is-norfund/responsible-investor/climate-and-environment/>
29. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). *The Geography of Transport Systems*. <https://doi.org/10.4324/9781315618159>
30. Akhil, J., Samreen, S., Aluvalu, R., & Reddy, K. (2018). Cyber Physical Systems for Smart Cities Development. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7, 36–38. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.6.20229>
31. Aluko, S. (2024). Cybersecurity and defense in intelligent transportation systems. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 13, 871–879. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.13.1.0469>



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.